

## 星间激光通信系统粗精复合扫描技术\*

于志亮<sup>1</sup>,周乃新<sup>1</sup>,陈兴林<sup>1</sup>,曹开锐<sup>2</sup>,耿光晓<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150000;

2. 哈尔滨工业大学 可调谐激光(气体)技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150000)

**摘要:**星间激光通信系统主要分为捕获、瞄准、跟踪技术,其中捕获技术是星间激光通信系统实现通信的前提和保障。通过对星间通信捕获阶段信标光的粗瞄捕获原理、关键技术和工程应用等内容进行详细的研究,提出一种粗瞄与精瞄相互结合的螺旋-正弦复合扫描的方法。对该方法扫描过程中的数值分析表明,相比单一粗瞄扫描方式,粗精复合扫描方法的扫描漏扫区域比单一粗瞄扫描漏扫区域小、捕获概率更高、捕获时间短。该方法为星间激光通信扫描捕获过程提供了一种新的扫描方式,具有重要的意义。

**关键词:**星间通信;激光通信;扫描;捕获

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2016)05-158-05

## Research on coarse-fine composite technology for scanning in inter-satellite laser communication

YU Zhiliang<sup>1</sup>, ZHOU Naixin<sup>1</sup>, CHEN Xinglin<sup>1</sup>, CAO Kairui<sup>2</sup>, GENG Guangxiao<sup>1</sup>

(1. School of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China;

2. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

**Abstract:** The inter-satellite optical communication system consists of acquisition, pointing and tracking technology; the acquisition technology, which is the premise and guarantee for normal work. The principle of acquisition, key technology and engineering implementation under scanning stare mode were studied in detail. A method for combination of the coarse fine pointing of spiral sine was presented. Numerical simulation results for the scanning process prove that the proposed method has smaller missing scanning area, higher acquisition probability and shorter acquisition time when compared with the traditional single coarse scanning. The coarse fine scanning type is a new method for inter-satellite communication. The proposed method has an important significance in providing a new method for inter-satellite laser communication.

**Key words:** inter-satellite communication; optical communication; scanning; acquisition

星间链路通信技术已成为当下研究的前沿热门问题<sup>[1-4]</sup>,已引起世界各国的重视。传统通信是利用微波技术,但微波通信存在着数据传输量低,抗干扰能力弱,微波波束大<sup>[5]</sup>,在传输过程中向四周发散,容易被截获等缺点,尤其在军事上存在一定的弊端。激光通信相比微波通信突出的优点就是激光光束具有高的方向性、单色性、相干性和高亮度<sup>[6]</sup>。因此激光通信在航天领域已经成为热门研究话题,其中美国、日本和欧洲技术研究较为成熟,并已经进入试验阶段<sup>[7]</sup>。国内外学者对这方面进行了深入的研究<sup>[8-10]</sup>。星间激光通信大体分为捕获、瞄准、跟踪三部分<sup>[11-12]</sup>,文献<sup>[13]</sup>分析了捕获、瞄准、跟踪(Acquisition Pointing Tracking, APT)系统各单元间使用电荷

耦合元件(Charge Coupled Device, CCD)以简单算法完成捕获性能,工程中易实现。文献<sup>[14]</sup>提出了一种信标光和信号光集于一体的捕获方法,该方法利用象限探测器进行捕获和接收,该方法虽然在硬件设计上大大简化,但是在工程实现上增加了算法的复杂度和实现程度以及实际操作难度。文献<sup>[15]</sup>通过对捕获过程进行数学建模,推导出全场和步进式扫描模式下的单场扫描平均捕获时间,得到解析表达式,并分析不同系统和参数对这两种扫描模式的影响,并比较出两种扫描方式的优劣。传统的扫描方式主要是以粗瞄方式进行捕获信标光,粗扫到信标光后,光通过分束镜进入到精瞄系统,由精瞄系统进一步进行瞄准和跟踪。激光通信终端搭载于卫星平台上,相互通信

\* 收稿日期:2015-05-14

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(11404082,61503096);黑龙江省博士后基金资助项目(LBH-Z14101)

作者简介:于志亮(1987-),男,黑龙江同江人,博士研究生,E-mail:yuzl@hit.edu.cn;

陈兴林(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:chenxl@hit.edu.cn

双方卫星根据星历确定对方大致出现区域,对准对方可能出现的区域进行扫描捕获。

### 1 不确定域

常用终端有潜望镜式和经纬仪式两种,其中潜望镜式终端结构如图1所示<sup>[16]</sup>,潜望镜式终端口径较小主要应用于小型卫星中,并且若信标光在方位轴电机正上方,则终端捕获信标光概率较低。

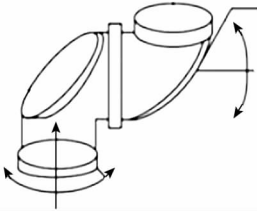


图1 潜望镜式光通信终端

Fig.1 Periscope-type optical communication terminal

经纬仪式终端如图2所示,该终端体积大,具有较大转动惯量,受外界影响小。因此在目前某型号项目中采用经纬仪式激光通信终端。经纬仪式终端由跟瞄机构[1]、U形框[1-1]和方位轴[1-2]、俯仰轴[2]、调试工装[3]、俯仰轴弹簧[4]组成。

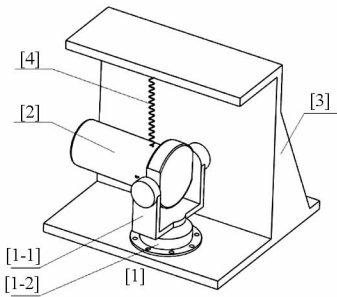


图2 经纬仪式激光通信终端

Fig.2 Theodolite-type laser communication terminal

终端其运动学方程如式(1)和式(2)所示,该方程为理想无干扰情况下的方程,然而终端在外太空中由于振动等干扰光斑在目标区域附近抖动,因此将这部分区域称为不确定区域,如图3所示。

终端运动学方程为<sup>[17]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = [\psi]^{-1} [\Theta]^{-1} [\Phi]^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ \dot{\Theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\Phi \tan\Theta & \cos\Phi \tan\Theta \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \sin\Phi \sec\Theta & \cos\Phi \sec\Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2)$$

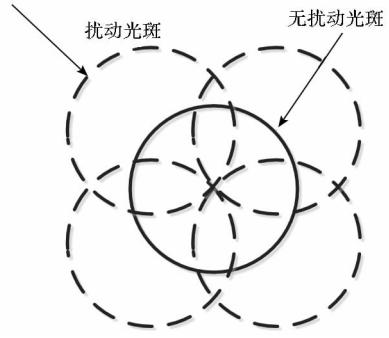


图3 信标光扰动示意图

Fig.3 Scheme of beacon disturbance

$$[\Psi]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\Psi & -\sin\Psi & 0 \\ \sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[\Theta]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & 0 & \sin\Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Theta & 0 & \cos\Theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[\Phi]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $(\Psi, \Theta, \Phi)$  为终端体轴系相对于参考轴系欧拉角;  $(x, y, z)$  为终端质心在参考坐标系中位置;  $(u, v, \omega)$  为终端速度在体坐标轴上的分量;  $(\dot{\Psi}, \dot{\Theta}, \dot{\Phi})$  为终端体轴系相对于参考轴系的欧拉角速率;  $(p, q, r)$  为终端相对于参考坐标系的旋转角速度在体轴坐标系上的分量。

### 2 扫描理论分析

传统激光通信终端一般采用粗瞄螺旋扫描方式,本文在粗瞄基础上将精瞄以正弦方式扫描也加入扫描过程中形成粗细复合螺旋扫描。在分析扫描过程时,以激光通信终端镜筒中心为原点  $O$ ,以卫星在轨运行平面为基本面,  $y$  轴指向地心,  $x$  轴与  $y$  轴垂直,  $z$  轴与  $x$  轴、 $y$  轴构成右手坐标系如图4所示。

定义俯仰角  $\theta_v$  为目标通信终端和发射终端连线与  $z$  轴方向夹角,定义方位角  $\theta_h$  为通信终端平面投影与  $x$  轴的夹角,接收终端镜筒光斑法向方向矢量为  $r_A(\theta_v, \theta_m)$ ,发射终端镜筒光斑法向矢量为  $r_B(\theta_v, \theta_h)$ 。在捕获初期两终端根据对方姿态和位置信息进行粗瞄,当发射终端  $r(\theta_v, \theta_h)$  与接收终端  $r_B(\theta_v, \theta_h)$  重合时才能实现通信。但是实际通信过程中由于卫星平台震动以及其他因素影响,二者之间存在一定的偏移量,其偏移量如式(6)所示。

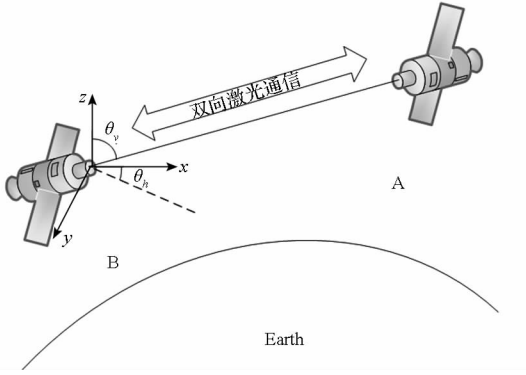


图 4 卫星激光通信示意图

Fig.4 Scheme of inter-satellite laser communication

$$r_A - r_B = \sigma_i(\theta_v, \theta_h) + \delta_i(\theta_v, \theta_h) \quad (6)$$

其中,  $\sigma_i(\theta_v, \theta_h)$  为通信终端可预测但不可消除误差或者其他随机误差所产生的角度固定偏移量,  $\delta_i(\theta_v, \theta_h)$  为变化值在一定范围内的随机角度偏移量, 该偏移量主要由于卫星平台振动、轨道偏移以及指向误差和姿态误差等原因产生。在实际工程中方位轴和俯仰轴均为独立执行机构, 因此, 二者误差也为独立并且具有相同分布, 其概率密度分布如式(7)所示:

$$f(\theta_{v,h}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{v,h}} \exp\left(-\frac{\theta_{v,h}^2}{2\sigma_{v,h}^2}\right) \quad (7)$$

根据概率可以得出终端在不确定域内的捕获概率为:

$$P = \iint_{\Omega} f(\theta_v, \theta_h) d\theta_v d\theta_h \quad (8)$$

其中

$$f(\theta_v, \theta_h) = \frac{1}{2\pi\sigma_v\sigma_h} \exp\left[-\left(\frac{\theta_v^2}{2\sigma_v^2} + \frac{\theta_h^2}{2\sigma_h^2}\right)\right] \quad (9)$$

在粗瞄扫描过程中, 精瞄单元以图 5 所示正弦方式与粗瞄相结合的方式进行了螺旋正弦复合扫描。

在分析螺旋正弦扫描过程时, 采用极坐标方式, 其方程可表示为:

$$\rho = \frac{I_\theta}{2\pi}\theta + \beta\sin(\omega\theta) \quad (10)$$

其中,  $\beta$  和  $\omega$  分别为精瞄正弦扫描的扫描幅值和扫描角频率,  $I_\theta$  为扫描步长。

在分析终端捕获过程中, 假定方位轴和俯仰轴之间相对独立, 因此二者误差相对独立, 由此可令三个误差之间相等。根据式(7) 可得:

$$f(\rho, \theta) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

则平均捕获时间为:

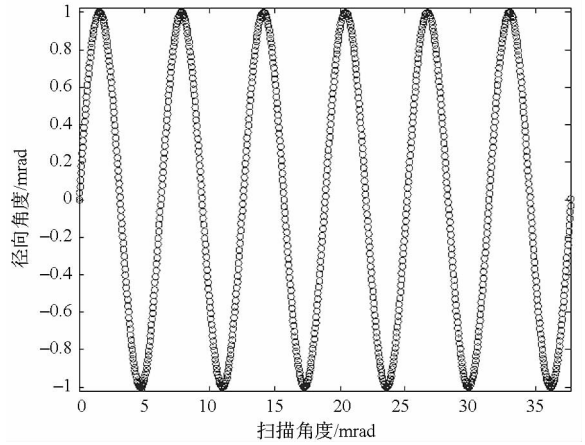


图 5 精瞄单元扫描示意图

Fig.5 Scheme of coarse scanning

$$ET = \iint_{\Omega} \frac{4\pi\theta^2 - \frac{\beta}{\omega}(\cos\theta - 1)}{F_{AC}I_\theta} \cdot \exp\left(-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{2\pi\sigma^2} \rho \cdot d\rho \cdot d\theta \quad (12)$$

### 3 仿真分析

常见的扫描方式有玫瑰扫描、矩形扫描、矩形螺旋扫描和螺旋扫描等, 如图 6 所示。

玫瑰扫描优势在于卫星平台的抖动对于扫描的过程影响小, 但是该扫描方式存在漏扫区域并且扫描效率低, 并且软件在其路径实施上较为复杂。矩形扫描在软件设计和实现上较为简单, 并且能较好地覆盖扫描范围, 但是其扫描时间长, 扫描效率低。螺旋矩形扫描虽然能克服矩形扫描时间长的弊端, 卫星平台振动和其他外界干扰对螺旋矩形扫描影响大, 在转折点处容易偏离轨道, 造成捕获失败。因此, 在目前星间激光通信扫描方式中, 基本上都采用螺旋扫描。

本文对于螺旋形 - 正弦扫描方式, 采用步进式等速率扫描, 即相邻两点之间扫描的速度相同。本文以阿基米德螺旋线为模型来描述螺旋正弦扫描, 即:

$$\rho = \alpha\theta + \beta\sin(\omega\theta) \quad (13)$$

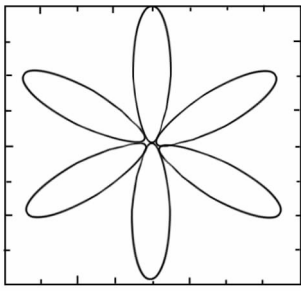
在极坐标下设弧长为  $s$ , 极径为  $\rho$ , 根据弧长公式有:

$$ds = \sqrt{(\dot{\rho})^2 + (\rho\dot{\theta})^2} d\theta \quad (14)$$

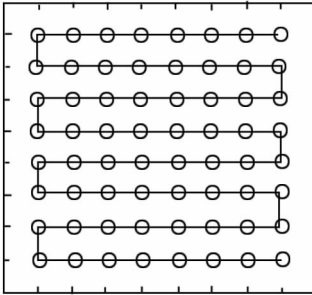
则线速率可表示为:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (15)$$

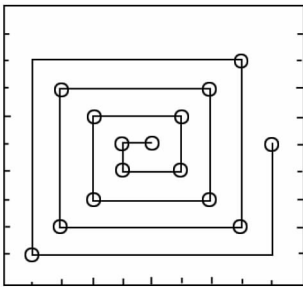
根据式(13) ~ (15) 可得:



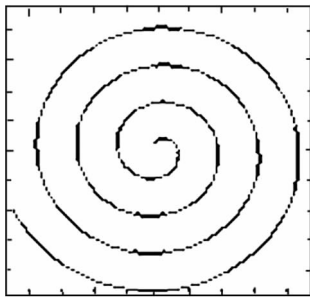
(a) 玫瑰扫描  
(a) Rose scanning



(b) 矩形扫描  
(b) Rectangle scanning



(c) 矩形螺旋扫描  
(c) Rectangle spiral scanning



(d) 螺旋扫描  
(d) Spiral scanning

图6 常见扫描方式

Fig. 6 Common scanning method

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v}{\sqrt{[\alpha + \beta\omega\cos(\omega\theta)]^2 + [\alpha\theta + \beta\sin(\omega\theta)]^2}}$$

虽然上式可以求出角速率变化的具体表达式,但是为了便于在工程中实现,对于上述微分通过龙格库塔法进行求解。

$$\begin{cases} y(i+1) = y(i) + h \times (k1 + 2 \times k2 + 2 \times k3 + k4)/6 \\ k1 = f(x(i), y(i)) \\ k2 = f(x(i) + h/2, y(i) + h \times k1/2) \\ k3 = f(x(i) + h/2, y(i) + h \times k2/2) \\ k4 = f(x(i) + h, y(i) + h \times k3) \end{cases}$$

通过迭代得到方位角和俯仰角分别为:

$$\begin{cases} \theta_v = [\alpha\theta + \beta\sin(\omega\theta)] \cos\theta \\ \theta_h = [\alpha\theta + \beta\sin(\omega\theta)] \sin\theta \end{cases} \quad (16)$$

其搜索过程如下:

**步骤1:**先根据不确定域和捕获概率将扫描镜筒指向光斑可能出现的区域;

**步骤2:**选取扫描螺旋间距和龙格库塔迭代步长以及精瞄扫描参数  $\alpha$  和  $\beta$ , 确定扫描放置点位置;

**步骤3:**判断扫描过程中扫描螺距和迭代步长是否能完全覆盖不确定区域,若能完全覆盖不确定域则保留参数,当下一次扫描时直接调用该参数;

**步骤4:**若第三步扫描螺旋和迭代步长不满足覆盖条件,则重新选取相关参数进行第二步扫描过程。通过仿真可得螺旋正弦扫描曲线如图7所示。

从图7可以看出,螺旋正弦扫描有效覆盖具有面积大、漏扫区域小的优点。但是这种方式在扫描最初一段时间内,内圈扫描重复率高,从而使扫描效率降低,捕获时间长。

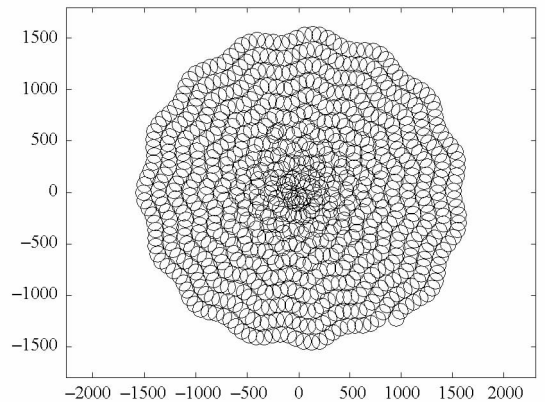


图7 螺旋正弦扫描示意图

Fig. 7 Scheme of spiral-sine scanning

基于以上问题,在螺旋正弦基础上进一步改进,由于目标信标光在扫描前几圈内出现概率较低,因此为了避免内圈较大的重复率,在最初的扫描内圈中采用单一的螺旋扫描方式进行快速扫描,然后精瞄系统和粗瞄系统进行耦合进行扫描,如图8所示。

通过图8的螺旋正弦扫描可以看出,相比传

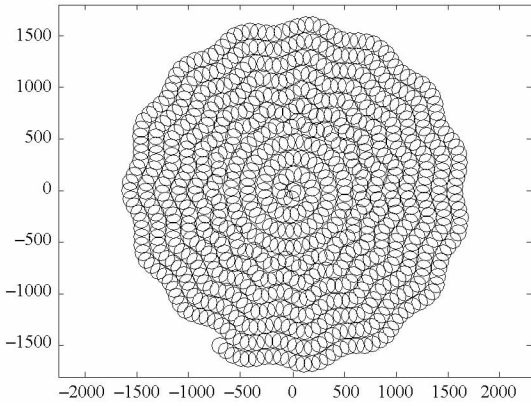


图 8 改进螺旋正弦扫描示意图

Fig. 8 Scheme of improvement spiral-sine scanning

统的粗瞄螺旋扫描方法,该方法有以下几个优点:

1) 内圈螺旋的螺旋正弦扫描相比螺旋正弦扫描内圈扫描的重叠率大大降低,减少了扫描过程中步长的覆盖,提高了扫描步长利用率;

2) 粗精复合螺旋正弦扫描相比粗瞄螺旋扫描减少了螺距之间漏扫区域,提高了扫描捕获概率,减少了扫描捕获时间;

3) 粗精复合螺旋正弦扫描技术在工程中软硬件等技术方面易于实现,操作简便,算法可靠,为星间通信提供一种新的捕获方法。

### 4 结论

星间激光通信技术的研究已经进入空间试验阶段,在整个通信系统中扫描捕获是实现卫星间相互通信的前提和保障,因此扫描捕获问题是整个技术中研究的重点。通过总结和归纳出粗瞄螺旋与精瞄正弦扫描相结合的扫描捕获方案,大大减少了扫描漏扫区域,提高了系统的捕获概率,从而降低了捕获时间。

该方法在工程中容易实现,控制过程以及方法简单、效率较高,提升了系统捕获性能,从而为星间激光通信扫描捕获技术提供了一种新的扫描方案。

### 参考文献 (References)

[1] Gawronski W, Racho C S, Mellstrom J A. Application of the LQG and feedward controllers to the deep space network antennas [J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 1955, 3(4): 416 - 421.

[2] Nielsen T T, Oppenhauser G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. SPIE, 2002, 4635: 1 - 15.

[3] 李献斌,王跃科,陈建云. 基于星历辅助的导航星座星间链路捕获初始信息求解算法[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(2): 87 - 92.

LI Xianbin, WANG Yueke, CHEN Jianyun. A capture initial information solution method for ISLs of navigation constellation

based on ephemeris-aided method [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(2): 87 - 92. (in Chinese)

[4] Laurent B, Planche G. Silex overview after flight terminals campaign[J]. SPIE, 1997, 2990: 10 - 22.

[5] Hamid Hemmati. 深空光通信[M]. 王平,孙威,译. 北京:清华大学出版社,2009:283 - 296.

Hamid Hemmati. Deep space optical communications[M]. Translated by WANG Ping, SUN Wei. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 283 - 296. (in Chinese)

[6] 陈钰清,王静环. 激光原理[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992:47 - 51.

CHEN Yuqing, WANG Jinghuan. Principles of laser [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992: 47 - 51. (in Chinese)

[7] Gregory M, Heine F F, Lange R. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates [J]. Optical Engineering, 2012, 51(3): 031202.

[8] Guelman M, Kogan A, Kazarian A, et al. Acquisition and pointing control for inter-satellite laser communications[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2004, 40(4): 1239 - 1248.

[9] Toyoshima M, Yamakawa S, Yamawaki T, et al. Long term statistics of laser beam propagation in an optical ground to geostationary satellite communication link [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2005, 53(2): 842 - 848.

[10] Shimizu S, Kodeki K, et al. Development of acquisition and tracking system for next generation optical intersatellite communication [J]. IEEE Conference Publications, 2011: 132 - 135.

[11] Borrello M. Multistage pointing acquisition and tracking (PAT) control system approach for air to air laser communications [C]//Proceedings of American Control Conference Portland, USA: AACC, 2005.

[12] Gagliardi R M, Karp S. 光通信技术与应用[M]. 陈根祥,译. 北京:电子工业出版社,1998:117 - 120.

Gagliardi R M, Karp S. Optical communication technique and application [M]. Translated by CHEN Genxiang. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998:117 - 120. (in Chinese)

[13] Shrestha A, Brechtelsbauer M. Transportable optical ground station for high-speed free-space laser communication [J]. SPIE, 2012, 8517: 851706.

[14] Liu H Z, Ji Y F, Liu L R. Effect of aberration on performance of the bit error rate in an inter satellite coherent optical communication receiving system [J]. Acta Optical Sinica, 2012, 32(1): 0106002.

[15] 李鑫. 星间激光通信中链路性能及通信性能优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

LI Xin. Optimization research on link and communication performance for intersatellite laser communications [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

[16] 谭立英,吴世臣,韩琦琦,等. 潜望镜式卫星光通信终端的 CCD 粗跟踪[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 270 - 275.

TAN Liying, WU Shichen, HAN Qiqi, et al. Coarse tracking of periscope-type satellite optical communication terminals [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 270 - 275. (in Chinese)

[17] 张家余. 飞行器控制[M]. 北京:宇航出版社,1993:46 - 48.

ZHANG Jiayu. Aircraft control [M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 1993: 46 - 48. (in Chinese)